

# 高解像度DEMの積雪分布を用いたダム流域の 積雪水量推定の試み

THE ESTIMATE OF THE SNOW WATER EQUIVALENT IN THE DAM BASIN  
USING SNOW DISTRIBUTION OF HIGH RESOLUTION DEM

鳥谷部寿人<sup>1</sup>・中津川誠<sup>2</sup>

Toshihito TOYABE, Makoto NAKATSUGAWA

<sup>1</sup>正会員 (独) 土木研究所寒地土木研究所水環境保全チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

To clarify the water balance of the melting snow period, we estimated snow water equivalent from spatial snow distribution using high resolution digital elevation model (DEM). The paper built a model to estimate a snow water equivalent using the spatial snow distribution provided from an airborne laser altimetry of the snow peak obtained in Jozankei dam basin in Sapporo. In addition, we estimated the secular variation of the snow water equivalent by incorporating snow depth and snow survey observed by a dam in a model.

As a result of analysis, the presumed precision included an error of 20% in comparison with the water balance of the melting snow period. Though, the adaptability of the model as the method to confirm snow survey was confirmed.

**Key Words :** Snow depth distribution, High resolution DEM, Snow water equivalent

## 1. はじめに

積雪寒冷地域の多目的ダムでは、冬期間山に蓄積された降雪が春先の融雪現象に伴い、流出する流入水を貯留することによって夏期の水利用を賄っている。このため、ダムでは積雪最盛期に積雪調査(スノーサーベイ)を行い、流域全体の積雪水量(以下、積雪包蔵水量と呼ぶ。)を推定している。しかし、厳冬の調査のため、調査地点は限られている。一方、積雪寒冷地の山岳部のダム流域は複雑な地形を有しており、丸安ら<sup>1)</sup>による航空写真を用いた研究から積雪分布も地形の影響を受けることが明らかにされている。近年、航空レーザ計測技術から得られる高密度の地形データを用いて、様々な地形解析が行われており、積雪前と積雪後の二時期の航空レーザ計測データを解析することにより、地形との関係から積雪量の空間的な分布を推定したHopkinsonら<sup>2)</sup>、岡本ら<sup>3)</sup>、鳥谷部ら<sup>4)</sup>による研究が報告されている。

航空レーザ計測は短時間に広範囲の計測が可能だが、一般にコストが高く、低空に雲が発達すると観測ができないなど、天候に左右されるため、この時期に得られたデータは貴重な資料である。

近年、融雪開始時期が早まることなどから、積雪調査結果と融雪期のダムへの流入量の相関が悪くなる事例が和智ら<sup>5)</sup>によって報告されており、空間的

な積雪分布を捉えることができる航空レーザ計測値の特徴を活かすことで、これまで限られた地点の積雪水量から推定していた積雪包蔵水量を精度良く推定することが可能となる。また、積雪調査結果のチェックができれば、ダムの水資源管理計画に役立つことが期待できる。

そこで本研究では、冬季の航空レーザ計測によって得られた積雪深分布から積雪水量を推定し、融雪期間の水収支を基に精度を検証し、積雪調査の計画立案に貢献するための方法を次のように検討した。

- 1) 航空レーザ計測が行われた2009年の積雪包蔵水量を検証するため、高解像度DEM (digital elevation model) から得られた積雪深分布を使って積雪水量の回帰式を策定し、積雪調査との比較を行った。
- 2) 当該年の積雪包蔵水量の検証を基に、過去の積雪調査から得られた積雪包蔵水量と、ダム管理所でルーチ的に観測されている積雪深データを使って積雪包蔵水量の年々変動を推定した。
- 3) 高解像度DEMで得られた積雪深分布に上記推定結果を反映させ、積雪の空間分布特性を組み込んだ積雪包蔵水量の推定モデルを策定し、ダムの水文資料を用いた水収支で検証し、モデルの適用性を確認した。
- 4) この積雪深分布を隣接する豊平峡ダムに適用し、

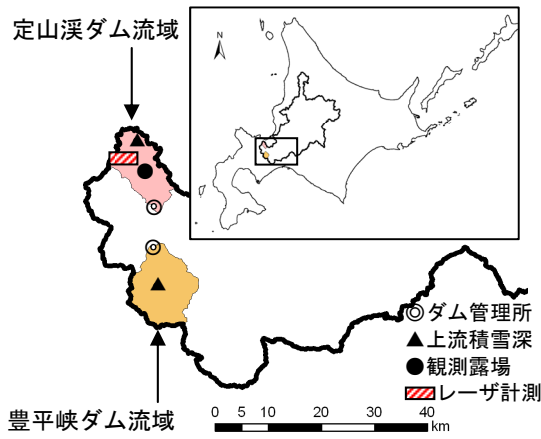


図-1 調査対象ダム流域

表-1 基礎資料

項目	種別
平均気温	ダム管理所観測値
降水量	
平均積雪深	
平均流入量	
積雪水量	
積雪深分布	高解像度DEM(5mメッシュ)
標高	
積雪密度	

高解像度DEMを用いた積雪包蔵水量の推定モデルの可搬性を確認した。

## 2. 対象流域、及び基礎資料

解析対象は、図-1に示す2つのダム流域である。定山溪ダムは洪水調節、水道水、発電を目的とした多目的ダムである。流域面積は104km<sup>2</sup>で標高帯は350mから1300m付近である。豊平峡ダムも洪水調節、水道水、発電を目的とした多目的ダムであり、流域面積134km<sup>2</sup>、標高帯は350mから1325m付近である。いずれも一級河川石狩川水系の支川豊平川の上流域に位置しており、流域の土地利用の多くが針広混交林を主体とする森林である。次に解析に用いた基礎資料を表-1に示す。ダム管理所観測値はルーチン的に観測されている1998年から2010年までの13年分の日単位の気象データならびにダム流入量データと毎年3月に行われた積雪調査のデータを用いた。積雪深分布データと地表標高データは定山溪ダム流域の一部(図-1赤斜線枠内10km<sup>2</sup>)で雪のない2008年10月31日および積雪最盛期の2009年3月8日に実施した航空レーザ計測値を基に5mメッシュで内挿した高解像度DEMを用いた。積雪密度は観測露場(図-1 標高400m)に設置された積雪重量計の値を用いた。

## 3. 2009年の積雪包蔵水量の推定

### (1) 高解像度DEMを用いた積雪水量の推定

ダム管理所では夏期の水資源量を推定する目的で積雪最盛期の3月上旬頃積雪調査を行い、調査地点

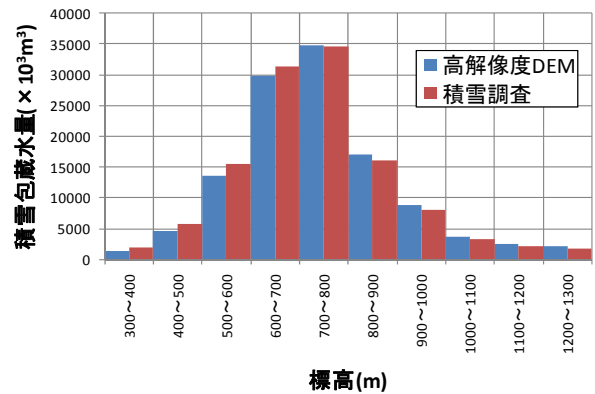


図-2 標高別積雪包蔵水量のヒストグラム

ごとの積雪深と積雪密度から積雪水量を計算し、調査地点標高と積雪水量の回帰式を求め、積雪包蔵水量を推定している。

積雪水量は一般的に次の回帰式で求められる。

$$\bar{S}_i = a_1 Z_i + a_2 \quad (1)$$

ここで、 $\bar{S}_i$  : 標高区分ごとの積雪水量(mm),  $Z_i$  : 標高区分の平均値(m),  $a_1$  : 積雪水量の増加率,  $a_2$  : 切片,  $i$  : 区分である。また、これに面積を掛け合計することで、積雪包蔵水量となる。

次に、高解像度DEMを用いて積雪調査と同様に標高と積雪水量の回帰式を求め、積雪包蔵水量を推定する。10km<sup>2</sup>当たり約40万個のサンプリングデータを標高25mピッチで区分して平均積雪深とした。なお、積雪水量を求めるためには、積雪密度を求めなければならない。鳥谷部ら<sup>6)</sup>によれば当該流域におけるこの時期の積雪密度は、空間的にあまり変化しないことが報告されている。ここでは、流域内の観測露場で一時間ごとに連続観測している積雪重量計と積雪深計から求まる積雪密度(日平均値で422kg/m<sup>3</sup>)を一定値として与えた。なお、この年の3月12日に行われた積雪調査の積雪密度もほぼ一様であり、観測露場で計測された結果ともほぼ等しい値を示した。

このようにして求めた計算結果を図-2に示す。図-2より標高別積雪包蔵水量の分布にそれほど差は無く、流域平均積雪水量の値は積雪調査で1159mm、高解像度DEMで1140mmとなった。

### (2) 積雪深の空間分布

次に積雪深の空間分布について考察する。積雪調査からは離散的な積雪深しか得られないが、航空レーザ計測では空間分布がわかる。図-3に積雪深のヒストグラムを示す。図-3より、標高帯により積雪深の平均および分散の程度は異なるが、その分布はほぼ正規分布(図-3赤線)に当てはまることがわかる。次に標高区分25mピッチでサンプリングした積雪深の平均と標高との関係を示したものが、図-4である。図-4より、平均積雪深は標高の増加とともに、線形的に増加していることがわかる。山田ら<sup>7)</sup>の既往研究からも積雪期の積雪深は高度とともに線形増加す

ることが知られており、対象流域においても同様な結果を得た。また、横軸に標高区分をとり、縦軸に標高区分ごとの積雪深のバラツキを標準偏差で示したものを図-5に示す。図-5より、積雪深の標準偏差は標高の増加とともにべき乗的に増加していることがわかる。このことから、標高帯ごとの積雪分布が正規分布に従うのであれば、分布を考慮した積雪水量を推定することが可能である。なお、尾根部において分布が異なるが、流域面積に占める割合が微少なことからここでは考慮していない。

### (3) 積雪分布を考慮した積雪水量の推定

3章(1)節では高解像度DEMで得られた積雪深の平均値を基に積雪水量を求めた。ここでは、積雪深の分布を用いて積雪水量を推定する。標高ごとの積雪分布は正規分布に従うことから、次式で示される。

$$S_z = \sum p \cdot S_i \quad (2)$$

$$S_i = x \cdot \rho \quad (3)$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (4)$$

ここで、 $S_z$ ：標高区分ごとの積雪水量分布(mm)， $S_i$ ：積雪水量(mm)， $p$ ：頻度(%)， $x$ ：積雪深区分の平均値(m)， $\mu$ ：標高区分ごとの平均積雪深(m)， $\sigma$ ：標高区分ごとの積雪深の標準偏差(m)， $\rho$ ：積雪密度( $\text{kg/m}^3$ )は3章(1)節と同様に一定値として与えた。このようにして求めた結果を表-2に示す。合わせて積雪調査、DEM平均積雪深から求めた結果ならびに積雪調査が行われた2009年3月12日から2009年6月30日までの期間の水収支も示す。口澤ら<sup>8)</sup>の当該流域での研究より、森林域では実蒸発散量は可能蒸発散量に近い値を示すことから、この期間の水収支はダムの総流入量から総降水量を引いた値に、Hamon法(式(5))で推定した可能蒸発散量を加えた値で示す。なお、融雪開始の頃は気温が低いため、降雪となる場合もあるが、対象とする期間内の降水量全体に占める割合が少ないと考えられることや、データがヒータ付きの雨雪量計で雨量として扱われていることなどから観測値をそのまま用いた。

$$E_{pt} = 0.140D_0^2 q_t \quad (5)$$

ここで、 $E_{pt}$ ：月平均日蒸発散量(mm/day)， $D_0$ ：日照時間(月平均の1日の日の出から日没までの時間を12時間で除した量)， $q_t$ ：日平均気温に対する飽和絶対湿度( $\text{g/m}^3$ )である。表-2より、融雪期間の水収支との比較において、高解像度DEMで得られた積雪深の標準偏差を考慮した場合、標高の増加に伴う平均的な積雪深の増加に加え、特にバラツキが多い標高の高いエリアの積雪深分布を考慮した事によって、推定精度が向上することが示された。

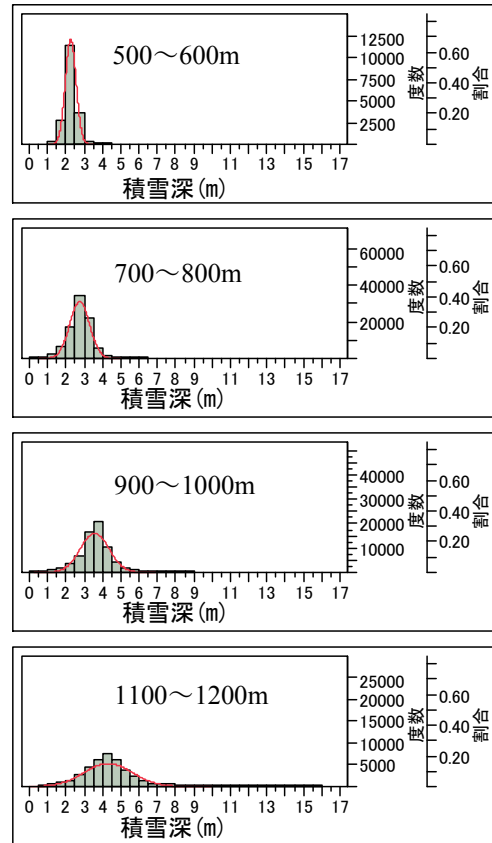


図-3 積雪深のヒストグラムと正規分布

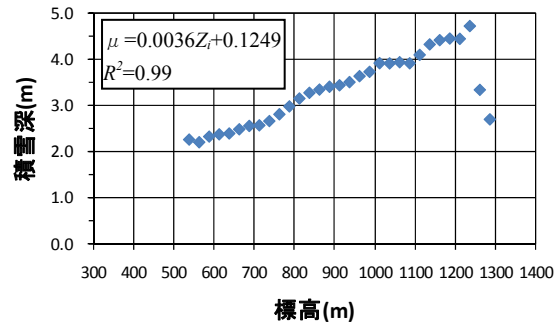


図-4 平均積雪深と標高の関係

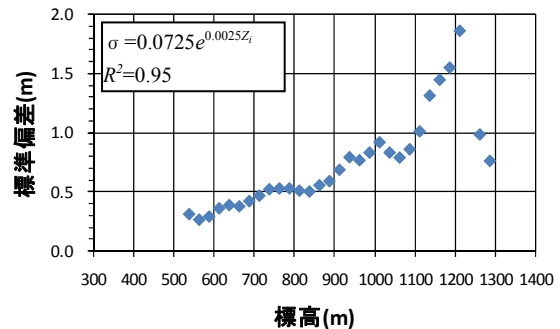


図-5 積雪深の標準偏差と標高の関係

表-2 推定結果

積雪包蔵水量		流入量	降水量	可能蒸発散量	水収支
積雪調査結果	DEM平均積雪深	$Q_i$	$R$	$E_{pt}$	$Q_i - R + E_{pt}$
$\times 10^6 \text{m}^3$	$\times 10^6 \text{m}^3$	$\times 10^6 \text{m}^3$	$\times 10^6 \text{m}^3$	$\times 10^6 \text{m}^3$	$\times 10^6 \text{m}^3$
120.58	118.52	103.28	16.95	18.39	104.71

#### 4. 積雪水量の年々変動

##### (1) 積雪水量の経年変化

次に毎年の積雪調査結果より、積雪水量の年々変動について考察する。定山溪ダムでは1998年春から2006年春まで3コース24地点で調査が行われ、2007年春以降は2コース8地点で調査が行われている。一方豊平峡ダムでは1998年春から2007年まで2コース14地点で調査が行われ、2007年春以降は2コース12地点で調査が行われている。図-6(1)に定山溪ダムの13年分の積雪調査および航空レーザ測量から求めた積雪水量をプロットした。積雪調査はおおむね標高350mから900mの範囲であり、航空レーザ測量は500mから1300mまでの範囲である。積雪調査の値は年毎にばらつきがあり、標高に対する積雪水量の相関係数は0.53であった。また、標高に対する積雪水量の増加率 $a_1$ は0.6~1.7, 切片 $a_2$ は-82.1~592.7の範囲であった。一方、航空レーザ測量から求めた積雪水量の増加率 $a_1$ は1.5(山頂尾根部を除く)であり、積雪調査から求めた標準偏差の範囲内であった。図-6(2)は豊平峡ダムの13年分の積雪調査および定山溪ダム流域内で行われた航空レーザ測量から求めた積雪水量をプロットしたものである。積雪調査は650mから950mの範囲である。航空レーザ測量の積雪水量と比較すると、積雪調査の値は相対的に下方へスライドしており、標高当たりの積雪水量は定山溪ダム流域より少ないことがわかる。積雪調査による値は年毎にばらついており、標高に対する積雪水量の相関係数は0.09と小さかった。また、標高に対する積雪水量の増加率 $a_1$ は0.2~1.1, 切片 $a_2$ は53.0~771.2の範囲であった。なお、両ダム流域における $a_1$ と $a_2$ の範囲は異なるが、ばらつきの程度はほぼ一致している。

##### (2) 各年の積雪包蔵水量の推定

融雪期の積雪密度が標高に対してあまり変化しないことから、標高をパラメータとして積雪深の空間分布が決まれば各年の積雪水量を推定することが可能である。ここで、ダム管理所でルーチン的に観測されている積雪深データと積雪調査から求められた積雪包蔵水量との関係について図-7に整理した。図-7は積雪調査日のダムサイト(上段:標高393m)と春香山(下段:標高565m)で観測された日平均積雪深と積雪包蔵水量の関係を整頓したものである。図-7よりいずれの積雪深も積雪包蔵水量との相関が見られた。よって、この関係を基に、各年の積雪水量の推定を試みた。

標高ごとの積雪水量は式(1)から求まるので、切片 $a_2$ について解くと式(6)となる。いま積雪包蔵水量と積雪調査日の日平均積雪深に相関があることから、式(6)を式(7)と置くことで切片 $a_2$ は年毎の変動量と考えることができる。

$$a_2 = \bar{S}_i - a_1 Z_i \quad (6)$$

$$a_2 = b_1 x_0 + b_2 \quad (7)$$

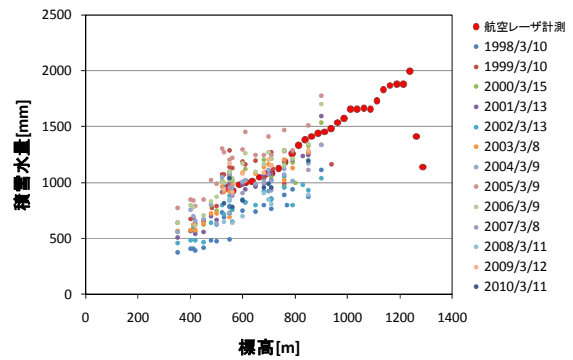


図-6(1) 積雪水量の経年変化(定山溪ダム)

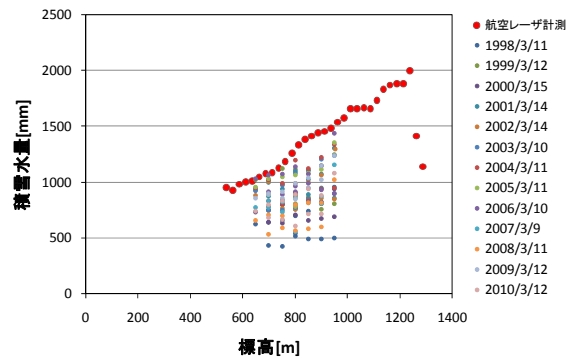


図-6(2) 積雪水量の経年変化(豊平峡ダム)

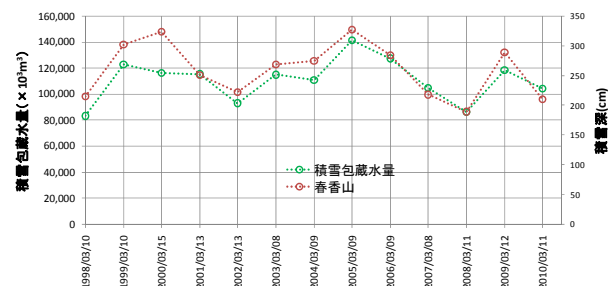
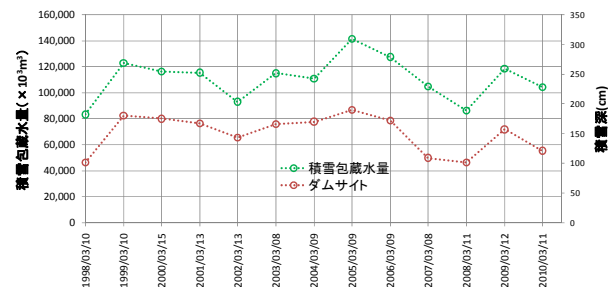


図-7 積雪包蔵水量と積雪深の関係(定山溪ダム)

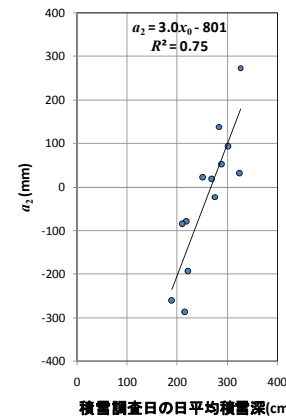
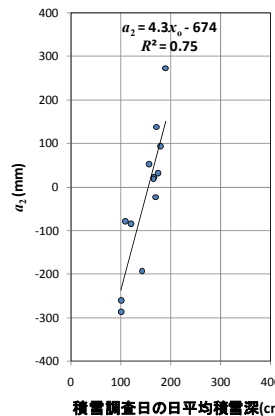


図-8 積雪水量と積雪深の関係(定山溪ダム)

ここで、 $x_0$ :積雪調査日の日平均積雪深(cm),  $b_1$ ,  $b_2$ は回帰係数である。 $a_1$ に航空レーザ計測から求められた値を与え、各年の切片 $a_2$ と観測所の積雪深の関係を整理したものが図-8である。これに回帰直線を当てはめると $b_1$ ,  $b_2$ が求まる。

### 5. 積雪分布を考慮した融雪期の水収支

4章(2)節で求めた変動量を積雪分布に当てはめて積雪包蔵水量の推定を行う。標高区分ごとの平均積雪深は図-4で与えられることから、式(7)の $a_2$ を式(8)に代入し、式(8)を式(4)に代入することで年ごとの積雪水量の分布を求める。ここで、式(7)の右辺の回帰係数は図-8のダムサイトの観測値を基に $b_1 = 4.3$ ,  $b_2 = -674$ として与えた。

$$\mu = 0.0036Z_i + \frac{a_2}{\rho} \quad (8)$$

次に推定した積雪包蔵水量と融雪期のダムの水収支との比較を行い、長期的水収支の観点からモデルの適用性を確認した。図-9は1998年春から2010年春までの13年間について横軸に積雪調査日の翌日から6月30日までの期間の水収支をとり、縦軸に積雪包蔵水量をとって比較したものである。積雪分布を考慮したモデル値を×印、積雪調査で得られた値を○印でプロットした。なお、水収支は3章(3)節と同様に整理した。また、水収支を真値として積雪包蔵水量の二乗平均平方根誤差RMSEを式(9)から求め、図-9に記載した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2} \quad (9)$$

ここで、 $X_i$ :積雪包蔵水量の推定値,  $x_i$ :水収支,  $n$ :年数,  $i$ :年を表す。RMSEは推定精度を表す指標であり、 $18.2 \times 10^6 m^3$ となった。これは水収支から求まる融雪量の平均値 $97 \times 10^6 m^3$ に対して2割程度の誤差を持つ事となる。推定誤差の原因を特定することは困難であるが、図-9から比較的雪の多い年の精度が良いように見える。航空レーザ計測が行われた2009年春は雪の多い年に当たることから、こうした積雪分布の特徴が表れた可能性が考えられる。

### 6. 豊平峡ダム流域における積雪水量の推定

次に、この積雪分布を隣接する豊平峡ダム流域に適用し、モデルの可搬性について確認する。

本来、別の年、別の流域でそれぞれ航空レーザ計測を行い、分布を決めれば良いが多く時間とコストがかかる。ここでは限られたデータではあるが、地形の影響を反映した航空レーザ計測の特色を活かし、積雪水量の推定を試みる。なお、年ごとの変化については図-8のような相関が得られたことから、この関係を用いて推定する。

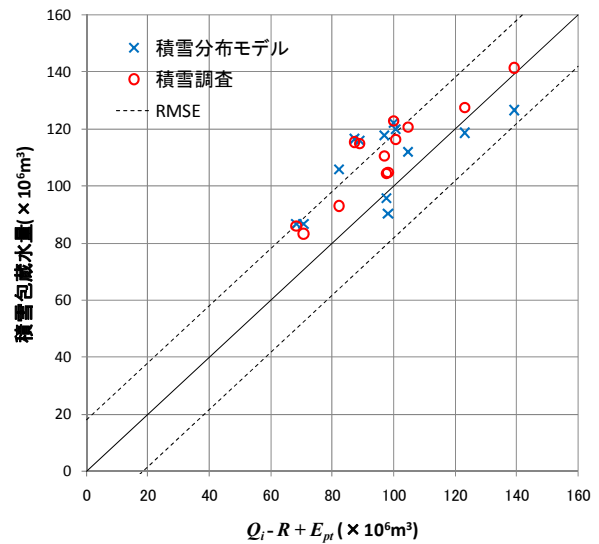


図-9 積雪包蔵水量の推定値と水収支の比較 (定山溪ダム)

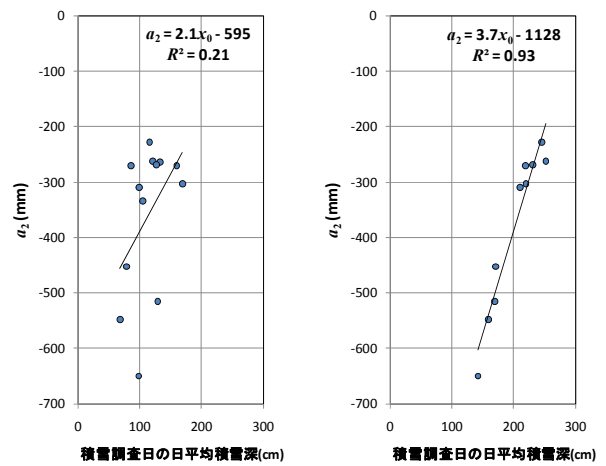


図-10 積雪水量と積雪深の関係 (豊平峡ダム)

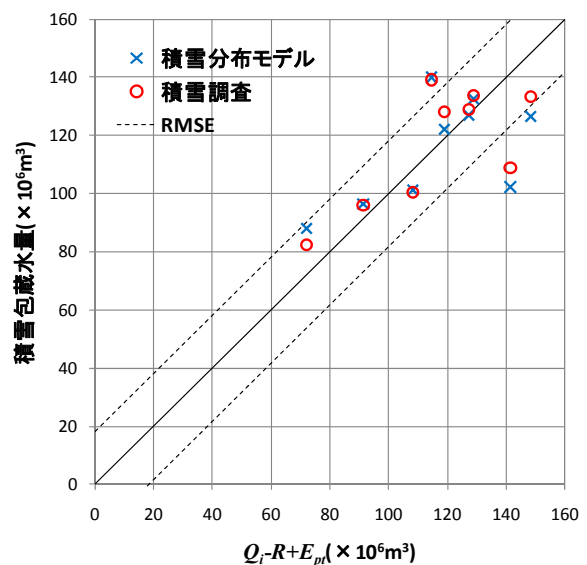


図-11 積雪包蔵水量の推定値と水収支の比較 (豊平峡ダム)

まず、式(7)を使って豊平峡ダムの積雪水量と積雪調査日の日平均積雪深の関係を図-10に示す。ここでは1998年春から2010年春までの13年間を対象に解析を行った。図-10より、ダムサイト(標高485m)では相関が低く、大二股(標高760m)では欠測(2002年, 2004年, 2007年)があるものの、高い相関が得られた。よって、大二股の観測値を基に式(7)の $b_1$ ,  $b_2$ を求め、式(2), 式(3), 式(4)から積雪包蔵水量を推定した。

次に算定した積雪包蔵水量と融雪期のダムの水収支との比較を行い、長期的水収支の観点からモデルの適用性を確認した。図-11は横軸に積雪調査日の翌日から6月30日までの期間の水収支をとり、縦軸に積雪包蔵水量をとって比較したものである。なお、降水量が長期間欠測した2001年、大二股の日平均積雪深が欠測している2002年, 2004年, 2007年は除外している。積雪分布を考慮したモデル値を×印, 積雪調査で得られた値を○印でプロットした。なお、豊平峡ダムの水収支は3章(3)節と同様に整理した。また、豊平峡ダムについても式(9)からRMSEを求めたところ、 $18.2 \times 10^6 \text{m}^3$ となった。これは水収支から求まる融雪量の平均値 $117 \times 10^6 \text{m}^3$ に対して2割程度の誤差を持つ事となり、定山溪ダム流域とほぼ同じ結果となった。

## 7. まとめ

本報告において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) レーザプロファイラで計測した高密度な積雪深の空間分布を入力値として統計的に解析し、ダム流域における積雪最盛期の積雪分布の空間的な特性を明らかにした。
- 2) 上記で明らかとなった積雪深の空間的な分布特性を考慮し、ルーチン的に観測している積雪深データと積雪調査データを使って、経年的な積雪包蔵水量を推定した。
- 3) 融雪期の水収支を基に定山溪ダム流域の積雪包蔵水量を評価した結果、推定値は水収支から求まる平均的な融雪量に対して2割程度の誤差を含むものの積雪調査と同程度の結果を得ることができた。
- 4) また、モデルの可搬性について確認するため、隣接する豊平峡ダム流域で解析を行った結果、定山溪ダム流域と同程度の結果が得られた。

近年、リモートセンシング技術の進展に伴い、詳細な地形情報が公開され、手軽に入手することが可能となって来ている。今後リモートセンシング技術が進展し、積雪水量の分布等が明らかとなれば、融

雪流出解析などに応用することが可能となる。本研究は今後発展が見込まれる先進技術を融雪流出解析に活用する前段として、積雪包蔵水量の推定を試みた事例である。今回1シーズンのサンプリングデータのみを用いて大胆な積雪包蔵水量の推定を試みた。絶対値としての精度は低いものの、年ごとの水収支の傾向をある程度把握できた。ここでは二つのダムを対象にモデルの適用を試みたが、今後は他のダムへ適用するなどして改善すべき点や適用の範囲について検証していきたい。

**謝辞:** 本論文をまとめるにあたり、北海道開発局札幌開発建設部豊平川ダム統合管理事務所から観測場所の提供を受けるなど多大な協力を頂いた。査読者からは、原稿を改良するのに役立つ貴重なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 丸安隆和, 内田正人, 田浦秀春: 航空写真による積雪分布および積雪量の解析方法に関する研究, 土木学会論文集, 153, pp41-54, 1968.
- 2) Hopkinson C., Sitar M., Chasmer L., Gynan C., Agro D., Enter R., Foster J., Heelsi N., Hoffman C., Nillson J., Pierre S R.: Mapping the Spatial Distribution of Snowpack Depth Beneath a Variable Forest Canopy Using Airborne Laser Altimetry, Proceedings of the 58th Annual Eastern Snow Conference, Ottawa, Ontario, Canada, pp253-264, 2001
- 3) 岡本隆, 黒川潮, 松浦純生, 浅野志穂, 松山康治: 山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討, 水文・水資源学会誌, 第17巻5号, pp529-535, 2004.
- 4) 鳥谷部寿人, 中津川誠, 石谷隆始, 菊地渉, 山下彰司, 清治真人: 航空レーザ測量成果を用いたダム流域における積雪深分布の把握, 水工学論文集, 第54巻, pp427-432, 2010.
- 5) 和智光貴, 山田朋人: 天塩川流域岩尾内ダムにおける融雪出水量と積雪水量の関係, 水文・水資源学会2010年度研究発表会要旨集, pp62-63, 2010.
- 6) 鳥谷部寿人, 山下彰司, 新目竜一: 積雪重量計を用いた融雪観測と積雪相当水量に関する一考察, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集 第65号 B-32 2009.
- 7) 山田知充, 西村寛, 水津重雄, 若浜五郎: 大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程, 低温科学, 物理篇, 37, pp1-12, 1978.
- 8) 口澤寿, 中津川誠: 積雪寒冷地流域における水収支と蒸発散量の評価, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集 第57号(B), pp422-425, 2001.

(2010. 9. 30受付)